

职业健康风险评估模型中化学物接触参数赋值的思考

丁佳韵¹, 刘美霞², 张济明¹, 尹艳², 周志俊¹

1. 复旦大学公共卫生学院/公共卫生安全教育部重点实验室, 上海 200032

2. 上海市疾病预防控制中心健康危险因素监测与控制所, 上海 200336

摘要:

职业健康风险评估模型的核心思想在于依据有害因素的危害特征和劳动者的接触水平, 对职业健康风险实施系统评估。职业接触评估基于浓度、频率和接触时间等反映劳动者实际接触有害因素的指标开展, 是健康风险评估中的关键环节。然而, 由于不同研究在接触评估参数赋值上的差异以及对多重职业危害接触的重视不足, 评估结果的准确性和可比性受到影响。本综述旨在探讨职业健康风险评估模型中接触评估参数的赋值及其规范化问题, 系统梳理了常用职业健康风险评估模型中接触评估相关参数的含义、赋值方法及其来源, 以期研究者提供规范化的评估工具, 提高职业健康风险评估的科学性和实用性。考虑到职业接触存在个体差异和时间波动, 建议研究者基于相似接触组(SEG)划分, 采用适当的抽样策略, 合理选择采样对象和时间, 并对所得数据进行统计推断, 以获得具有代表性的接触参数。对于多重危害因素的职业接触, 毒作用相似的化学物的联合暴露, 其健康风险评估方法已相对成熟; 而性质和健康效应不同的危害因素联合暴露的评估, 仍缺乏科学权威的解决方案, 亟须进一步研究探讨。

关键词: 职业健康风险评估; 相似接触组; 接触评估; 参数赋值; 联合暴露

Assignment of chemical exposure parameter in occupational health risk assessment models: Key consideration DING Jiayun¹, LIU Meixia², ZHANG Jiming¹, YIN Yan², ZHOU Zhijun¹ (1. School of Public Health/Key Laboratory of Public Health and Safety of Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200032, China; 2. Division of Health Risk Factors Monitoring and Control, Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China)

Abstract:

The core idea of occupational health risk assessment models is to systematically evaluate occupational health risks according to target hazard characteristics and relevant exposure levels of workers. Occupational exposure assessment is based on concentration, frequency, exposure time, and other indicators that indicate actual exposure of workers to occupational hazards, which is a critical component of health risk assessment. However, the accuracy and comparability of assessment results are affected by differences in parameter assignment for exposure assessment across different studies, as well as insufficient emphasis on multiple occupational hazard exposure. This review aimed to explore the assignment and standardization of exposure assessment parameters for occupational health risk assessment modeling, and systematically sorted out the meaning, assignment methods, and sources of exposure assessment related parameters in commonly used occupational health risk assessment models, with the goal of providing researchers with standardized assessment tools to enhance the scientific rigor and practicality of occupational health risk assessments. Considering the individual differences and temporal fluctuations in occupational exposure, it is recommended that researchers should adopt appropriate sampling strategies, reasonably select sample subjects and time based on the division of similar exposure group (SEG), and conduct statistical inference on the obtained data to derive representative exposure parameters. For combined exposure to chemicals with similar toxic effects, the health risk assessment methods are relatively mature. However, the assessment of combined exposure to hazards with different properties and health effects still lacks scientific authority and needs further research and discussion.

Keywords: occupational health risk assessment; similar exposure group; exposure evaluation; parameter assignment; combined exposure



DOI 10.11836/JEOM24398

基金项目

上海市三年行动计划项目(GWVI-11-1-37&41 和 GWVI-4)

作者简介

丁佳韵(1999—), 女, 硕士生;

E-mail: 22211020077@m.fudan.edu.cn

通信作者

周志俊, E-mail: zjzhou@fudan.edu.cn

作者中包含编委会成员 有

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2024-08-09

录用日期 2024-12-31

文章编号 2095-9982(2025)04-0497-07

中图分类号 R13

文献标志码 A

►本文链接、作者贡献申明

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM24398

►引用

丁佳韵, 刘美霞, 张济明, 等. 职业健康风险评估模型中化学物接触参数赋值的思考 [J]. 环境与职业医学, 2025, 42(4): 497-502, 511.

Funding

This study was funded.

Correspondence to

ZHOU Zhijun, E-mail: zjzhou@fudan.edu.cn

Editorial Board Members' authorship Yes

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2024-08-09

Accepted 2024-12-31

► Link to this article, author contribution statement

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM24398

► To cite

DING Jiayun, LIU Meixia, ZHANG Jiming, et al. Assignment of chemical exposure parameter in occupational health risk assessment models: Key consideration[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2025, 42(4): 497-502, 511.

职业健康风险评估是我国职业卫生工作的重要内容,通过识别工作场所中潜在的职业性有害因素,分析其危害特征及劳动者的接触情况,进一步评估职业健康风险水平,为制定相应的风险管理策略提供科学依据。目前国内外健康风险评估的方法多达十余种^[1],我国学者对国际上较为成熟的风险评估模型进行了广泛的研究和实践,并根据我国的实际情况对其进行借鉴和改良,建立了 GBZ/T 298—2017《工作场所化学有害因素职业健康风险评估技术导则》(以下简称“导则”)。

这些风险评估模型的核心思想基本一致,主要依据有害因素的危害特征和劳动者的接触水平对职业健康风险进行评估^[2]。其中危害表征是描述职业性有害因素对人体健康可能的损害性质和程度,主要依据是有害因素的毒性特征、暴露途径和生物学效应等毒理学资料和实证研究。相比之下,接触评估则是反映劳动者实际接触有害因素的情况,综合考虑接触有害因素的浓度、频率、时间等因素。这些因素都直接影响劳动者的职业健康风险程度。即使有害因素的危害程度较低,如果劳动者的接触水平非常高,那么实际的健康风险也相对较高;反之亦然。因此,尽管危害表征是基础,实际接触水平的评估对确保风险评估结果的质量起关键作用,值得研究者给予更多关注。

为了保证工作效率的同时提高接触评估结果的代表性,美国工业卫生协会(American Industrial Hygiene Association, AIHA)于 1991 年提出了职业接触评估的基本流程,推荐以相似接触组(similar exposure group, SEG)为评价单元对劳动者进行接触评估^[3]。

“导则”中也借鉴了这一概念,对 SEG 的定义为“一组对某一化学有害因素有相同接触特征的劳动者,组内劳动者的工作任务、操作方式及频次、工作流程、所用物料均具有相似性”。但若简单地以 SEG 的接触水平代表个体接触水平,而忽略了一些可能造成个体差异的因素(如通风条件、劳动者距污染源的距离和工作习惯等),将会使评估结果的代表性和准确性下降。此外,工作场所中化学物浓度波动等因素也会增加职业接触评估工作的难度。

因此,明确职业健康风险评估模型中接触评估的参数赋值是保证职业健康风险评估规范性的重要前提。本综述对目前常用的国内外职业健康风险评估模型进行系统梳理和总结,明确模型中接触评估相关参数含义、赋值以及来源,有助于研究者规范应用评估工具,提高职业健康风险评估的科学性和实用性。

1 常用职业健康风险评估模型中的接触评估

目前,我国相关研究中常用的职业健康风险评估模型主要包括美国环境保护署(U.S Environmental Protection Agency, EPA)吸入风险评估方法^[4]、英国健康危害物质控制策略简易法^[5][(Control of Substances Hazardous to Health Essentials, COSHH Essentials)模型]和新加坡化学毒物职业接触风险评估方法^[6](新加坡模型)等。为推进我国职业健康风险评估工作的规范化开展,原国家卫生和计划生育委员会针对工作场所中化学有害因素的职业健康风险评估,于 2017 年发布“导则”。“导则”中推荐的定量、定性和半定量的接触评估方法分别参考了美国 EPA 模型、英国 COSHH Essentials 模型和新加坡模型,并进行了适当的调整和优化。本综述主要以这 3 种常用风险评估模型中的接触评估环节为例展开讨论。

1.1 美国 EPA 模型

美国 EPA 模型为近年来我国吸入职业健康风险评估研究中应用最为广泛的定量风险评估模型^[3]。该模型来自 EPA 风险评估指南《人体健康风险评估手册》F 部分的吸入风险评估补充指南,可用于评估工作场所中化学物吸入的致癌和非致癌性风险。EPA 模型中的接触评估是根据空气中的污染物浓度,结合接触场景特征调整后得到时间加权平均浓度,用来估计每个研究对象通过吸入途径接触污染物的浓度(exposure concentrations, ECs)。

(1) 致癌性风险评估中 EC 的计算公式如下:

$$EC = (CA \times ET \times EF \times ED) / AT \quad (1)$$

其中,EC 为接触质量浓度(后称浓度),当进行职业接触评估时,由于接触水平较高,单位通常使用 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; CA(contaminant concentration in air)为工作场所空气中的化学物浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); ET(exposure time)为从业人员在工作场所中接触化学物的时间($\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$); EF(exposure frequency)为接触频率($\text{d} \cdot \text{年}^{-1}$); ED(exposure duration)为接触期限(年); AT(averaging time)=期望寿命(年) $\times 365(\text{d} \cdot \text{年}^{-1}) \times 24(\text{h} \cdot \text{d}^{-1})$ 。AT 的直译为平均时间,但根据公式可知,其代表的是期望寿命的小时数。目前大部分的研究中对于 AT 的计算均采用上述公式^[7-8],得到的 EC 为一生中的平均职业接触水平,进而评估的致癌风险为终生致癌风险。显而易见,EPA 模型是适用于普通民众吸入某化学物的风险评估的。用于职业人群时,需要注意生活环境和职业环境中的差异。虽然相较于职业接触水平,日常环境中致癌化学

物接触水平极低,但严谨来说劳动者的终生致癌风险也应该包括除职业环境外的生活环境中的致癌风险,应分别估算两种场景下的接触水平后再累计分析,方才合理。因此,若仅评估职业接触的终生致癌风险,在计算 EC 时,应将 AT 赋值为期望工作寿命的小时数。

(2) 在评估化学物致癌和非致癌风险的危害商数(hazard quotient, HQ)时,要先根据接触的持续时间和频率来判断接触模式(急性/慢性/亚慢性),再选用对应的公式计算。对于急性接触,CA 可以代替 EC。但对于慢性和亚慢性接触,EC 可以使用公式 1 计算,不同之处在于式中的 $AT=ED(\text{年})\times 365(\text{d}\cdot\text{年}^{-1})\times 24(\text{h}\cdot\text{d}^{-1})$,此时 AT 的含义应为职业接触危害因素的小时数。

1.2 新加坡模型

新加坡模型是针对化学毒物建立的一种半定量风险评估方法,风险等级根据危害等级和接触等级计算。其中接触等级取决于劳动者的受害频率和时长。当环境监测数据可用时,评价者可以根据受害水平直接对接触水平进行评级;当环境监测数据不可用时,可以根据接触化学物的性质和接触情况来确定接触指数和评级。

(1) 当空气污染物监测数据可用时,可以根据公式 2 计算基于标准工时制度(每天 8 h,每周 40 h 工作制)的每周时间加权平均接触水平。

$$E = (F \times D \times M) / W \quad (2)$$

其中, $E(\text{weekly exposure})$ 为每周的接触水平($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$),即工作 40 h 时间的加权值; $F(\text{frequency of exposure per week})$ 为每周的接触频率($\text{d}\cdot\text{周}^{-1}$); $D(\text{average duration of each exposure})$ 为每次接触的平均时长($\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$); $M(\text{magnitude of exposure})$ 为空气污染物的监测数据($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$); $W(\text{average working hours per week})$ 为平均周工作时间($40\text{ h}\cdot\text{周}^{-1}$)。

随后,计算接触水平与容许接触限值(permissible exposure level, PEL)之比,分别将 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 作为截断值,划分接触等级(exposure rating, ER)为 1~5。对于国内的相关研究,可以使用 2020 年起正式实行的 GBZ 2.1—2019《工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分:化学有害因素》(以下简称“标准”)提供的职业接触限值(occupational exposure level, OEL)中的时间加权平均容许浓度(permissible concentration-time weighted average, PC-TWA)替代 PEL。

值得注意的是,新加坡模型指出当每周工作时间超过 40 h 时,应根据公式 3 计算一个折减因子 $f(\text{weekly reduction factor})$,并将 PEL 与 f 值相乘,以调

整该限值。其中 H 为每周实际工作时间(h)。

$$f = \frac{40}{H} \times \frac{168 - H}{128} \quad (3)$$

此外,根据我国“标准”,在对长时间工作的 PC-TWA 进行调整时,原则上只对规定有 PC-TWA 的物质进行调整,对最高容许浓度(maximum allowable concentration, MAC)和短时间接触容许浓度(permissible concentration-short term exposure limit, PC-STEL)、具有刺激性和臭味的物质,以及单纯刺激性、安全或健康风险极低、生物半衰期少于 4 h 或技术上实施困难的物质不应进行调整。

(2) 当没有可用的空气污染物监测数据时,可以先判断接触化学物的蒸汽压力或空气动力学直径、危害控制措施、使用量和使用频率等因素对应的接触指数分级(exposure index, EI),再依据公式 4 计算 ER。

$$ER = [EI_1 \times EI_2 \times \cdots \times EI_n]^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

其中, ER 为接触等级; EI 为接触指数,根据接触剂量分为 1~5 级,1 级为极低接触水平,5 级为极高接触水平。

我国“导则”中半定量接触评估借鉴了上述的两种方法,分别命名为接触比值法和接触指数法,并在此基础上提出了综合指数法,即当有可用的空气中污染物浓度数据时,先计算其与 OEL 的比值,将其视作 EI 纳入到接触指数法中,综合考虑化学物的理化特性、使用量、职业防护和风险管理措施等因素,根据公式 4 计算 ER。但事实上,OEL 在制定时已经考虑了化学物的理化性质等因素,使用综合指数法可能存在相同定义重复使用的问题,需要再斟酌讨论。

1.3 英国 COSHH Essentials 模型

英国 COSHH Essentials 模型是对职业接触化学毒物和粉尘的定性风险评估模型,将化学品的物理特性(液态化学品的挥发性/固态化学品的扬尘性)和使用量分别分为高、中、低三个等级,并使用矩阵法进行接触分级。液态化学物的挥发性分级取决于其沸点和操作温度,当操作温度为 20 °C 时,沸点高于 150 °C 的液体为低挥发性,低于 50 °C 的液体为高挥发性,在 50 °C~150 °C 之间则为中度挥发性。对于固态的化学物,使用时基本不产生粉尘的为低扬尘性,使用时产生粉尘但很快落下的为中挥发性,使用时几乎不产生粉尘的为高挥发性。对于使用量的判断,则是根据供应商提供的化学品的量来判断,尤其是当无法明确使用量时则应该按照大量使用量来处理。

1.4 其他常用模型

除了上述 3 种最为常用的职业健康风险评估模型外,其他一些应用较为广泛的模型也以类似的参数来反映劳动者的职业有害因素的接触水平。例如,国际采矿与金属委员会(International Council on Mining and Metals, ICMM)职业健康风险评估操作指南(ICMM 模型)^[9]是根据劳动者接触有害因素的强度、频率和持续时间,计算半定量参数来表征职业接触。在 ICMM 定量赋值模型中,通过接触概率(probability of exposure, PrE)和接触时间(period of exposure, PeE)的乘积反映接触水平,其中 PrE 根据接触水平超过职业接触限值的可能性赋值(可能性低、中、高分别赋值为 3, 6, 10),PeE 根据接触频率和时长赋值(每个班次连续工作 1~2 h、2~4 h、8 h 分别赋值为 3、6、10);ICMM 定性方法则是简单地根据职业接触限值比值(E/OEL)将接触水平分为低(<0.5)、中(0.5~1)、高(>1)三个等级。此外,林嗣豪等^[10]建立的指数评估法中也是通过暴露比值参数(平均实测值/职业接触限值)来表征职业接触水平。值得注意的是,指数评估模型的优势在于模型中纳入了工作场所的作业条件参数,包括暴露时间、暴露人数、工程防护措施和个体防护措施,适用于根据工种或工序明确划分的同一作业单元下的职业健康风险评估。

2 常用职业健康风险评估模型的比较

我国学者对常用风险评估模型的适用范围和评估结果进行了大量的比较和探讨^[11-14]。就适用范围而言,EPA 模型依赖于综合风险信息数据库(integrated risk information system, IRIS)数据库,对于数据库中未收录的有害因素,EPA 模型则不适用于风险评估;新加坡模型适用于化学毒物的健康风险评估,当缺乏作业场所中毒物的检测资料时,仍可使用该模型的暴露指数法;英国 COSHH 模型可用于评估接触化学毒物和粉尘的健康风险,其法规涵盖了包括普通化学品(油漆、漂白剂)在内的大量化学品。在相同情境下应用不同健康风险评估模型得到的结果也有所不同。张宏群等以温度计制造企业为例,应用 7 种风险评估模型对劳动者健康风险进行判定,EPA 模型、新加坡模型和 COSHH 模型的评价结果分别为极高风险、高风险和低风险,其结果表明美国 EPA 模型和新加坡模型评价体系较为严格,能灵敏地将化学物浓度反映在评估结果中,但没有考虑用人单位的职业病防护措施;而在 COSHH 模型中,接触等级的划分与实际接触浓度无关,评估

结果较为宽松。徐秋凉等^[11]应用 6 种常用模型对小型印刷企业中接触有机溶剂岗位的工人进行健康风险评估,发现美国 EPA 模型和新加坡模型评估结果准确性较好,新加坡模型和其他模型结果之间的一致性较好。

3 对模型中接触评估参数赋值的思考

所列的几种模型都涉及某一参数的赋值问题。以美国的 EPA 模型为例,显而易见,该模型是针对个体风险的评估,但在大多数研究中通常将 SEG 的平均接触水平纳入到模型计算中。事实上,SEG 的划分应充分考虑劳动者的实际工作内容与工作方式。一些职业健康风险评估的研究从现实意义和研究目的出发,将同一个岗位上的工人视为一个 SEG,但 SEG 的概念不简单等同于劳动者的岗位和工种,因为即使是同岗位的劳动者也会面临同质性但接触水平不同的情况^[15]。

国外学者指出划分 SEG 时通常需要以下信息:岗位/工种、任务清单、工作中接害情况的详细描述、操作条件(温湿度等)以及现有的风险管理措施(risk management measures, RMM)、接害时长等^[16]。值得注意的是,RMM(如通风条件、个人防护用品等)会显著影响劳动者的接触水平,但却在很多风险评估研究中被忽略。例如,接触同样的挥发性化学溶剂生产线上的工人,其中一部分工人所处工作区域通风较差,而另一部分通风条件良好,则这些工人应归属于不同的 SEG。再比如,在同样工作条件下,一组工人有效佩戴了个人防护用品,而另外一组工人未正确佩戴,则理论上两组工人也应该被划分为不同的 SEG。

因此,SEG 的建立需要细致的访谈、职业卫生现场调查提供全面、真实和动态的接触信息,但在现实调查中其重要性往往被忽略。除了了解劳动者的工作任务、工艺流程和工作时间等信息外,还应该特别关注不同劳动者在同一工作场所中的个体接触情况和有效防护下的接触情况,区分环境浓度、个体接触浓度及在有效的设施和个体防护下的接触浓度,为风险评估提供更准确的依据。此外,也可以通过正式采样前的预采样,根据检测结果划分 SEG。

尽管对一个 SEG 来说,一定时间内个体间接触水平比较接近,但个体间的差异随着时间的变化难以避免。即使对同一个体而言,也存在着工作场所化学物浓度波动以及工作时间和每年接触天数的不同,在整个工作寿命期间上述参数的数值几乎不可能一成不变。但 EPA 文件没有清晰地交代参数有波动时如何选

取代表性数值的问题。同理,新加坡模型中的每周接触频率、每天接触的平均时长、空气污染物的浓度以及平均周工作时间都会存在波动,也面临如何获取代表性数值的问题。

解决职业接触评估中个体差异和时间波动问题,确定采样策略是首要前提。采用基于恰当的 SEG 划分的、对采样对象和采样时间进行随机抽样的策略,对获得的数据资料进行统计推断,可以在一定的可信度水平上评估一组劳动者的接触水平,在兼顾效率和准确性的同时,也有助于风险控制措施的选择和实施。定量和半定量的接触评估模型中空气中化学物浓度参数主要来自于环境监测,可分为个体监测和定点监测。从统计学的角度,一个 SEG 的接触水平不随时间变化的情况下,至少需要 6 次抽样得到个体监测结果才能保证误差在可接受范围内,结果具有较好的代表性^[15]。当考虑到日内职业接触水平的波动时,根据个体监测采样的时间点、采样时长、采集样品数量可分为 4 种采样方式^[17]: 全天一个样品(采样从一天的工作开始至结束,只采集一个样品); 全天连续多个样品(一天内采集多个样品但采样时点不同,采样时间总和等于一天的工作时长); 部分时间连续多个样品(一天内采集多个样品但采样时点不同,采样时间总和不足一天的工作时长); 随机抽取多个样品。全天一个样品或全天连续多个样品的采样策略对计算 8 h TWA 具有较高可信度。而对于定点监测,一些研究参照 GBZ 159—2004《工作场所空气中有害物质监测的采样规范》规定的评价监测方法,选择代表性采样点,连续采样 3 个工作日。但有学者从统计学的角度出发,认为连续 3 天采样不符合随机采样的原则; 当假设最高接触日数占总工作日的 20% 时,至少应该随机抽样 10 个工作日以上的样本才能保证监测结果的可信度达到 90%^[18]。

考虑到个体差异和时间波动,使用群体平均接触水平的参数(如均值和中位数)对模型进行赋值,可能使某些个体的风险被低估,影响职业接触限值的制定,增加职业病或事故的发生风险; 若使用接触水平的最高值则可能因高估风险而导致过度保护,增加不必要的成本和负担。因此,为提高劳动者接触评估的准确性,确保职业健康风险评估结果的科学性和合理性,从而制定更为有效和经济的风险管理策略,笔者认为在定量接触评估时,不仅要关注接触水平的均值或中位数,还应报告其 95% 的可信区间。这样能更好地反映高暴露个体(或高暴露时间)的风险,确保大多数劳

动者(或劳动者的绝大多数时间)的健康得到有效保护,避免因极端最高值而导致的过度保护。

4 工作场所接触多重职业危害的健康风险评估

多重职业危害接触在许多行业中十分普遍。例如,在化工、制造、采矿和建筑等行业中,劳动者经常同时接触粉尘和化学毒物等有害因素。这些复杂的职业危害接触情况对劳动者的健康具有潜在的累积和叠加效应,因此全面的职业健康风险评估至关重要。

对于多重化学物接触的职业健康风险,目前的评估方法较为成熟。美国 EPA 模型的评估方法是先计算各种因素的健康风险后再加和。新加坡模型指出,当劳动者同时接触 2 种或 2 种以上的具有相似健康效应的化学有害因素,需要考虑联合接触水平(combined exposure, $E_{combined}$),即多种化学物的接触水平与 PEL 的比值之和,再根据 $E_{combined}$ 进行风险评估。2 种方法的本质都是假设各因素的健康效应是相加的。类似地,我国“标准”中明确提出当 2 种或 2 种以上的有毒物质共同作用于同一器官、系统或具有相似的毒性作用时,或已知这些物质产生相加作用时,应按照公式 5 计算混合接触比值(I)。C 为测得各化学物的浓度,PC-TWA 为各化学物对应的容许浓度限值。

$$I = \frac{C_1}{PC-TWA_1} + \frac{C_2}{PC-TWA_2} + \cdots + \frac{C_n}{PC-TWA_n} \quad (5)$$

当工作场所中不仅涉及化学因素,还需要考虑噪声等物理因素时,则需要采用综合的评估方法。罗马尼亚劳动和社会保护部提出的罗马尼亚模型^[19]基于风险矩阵,根据各种有害因素的可能性-严重性的组合,定性评价其风险等级,并进一步通过风险等级的加权平均计算工作场所的总体风险水平,计算公式见公式 6。其中 N_r 为工作场所总体风险水平, r_i 为风险因素 r 的等级(与其风险等级值相同), R_i 为风险因素 r 的风险等级。

$$N_r = \frac{\sum_{i=1}^n r_i \times R_i}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad (6)$$

此外,模糊数学风险评估法和层次分析法也可以用于工作场所中的职业危害因素的综合评价^[20-21]。模糊数学风险评估法通过构建危害因素集、评价集、权重集和模糊关系矩阵,计算综合评价结果(权重集与模糊关系矩阵的乘积)。当生产过程中出现多个工序相互衔接、互相影响的复杂情况时,该模型可以发挥其

处理模糊问题的优势,但是容易受评价者的主观性影响。层次分析法的核心思想是将复杂问题拆解为多个层次和因素,对指标进行重要性比较以构建判断矩阵。作为一种定量与定性相结合的分析方法,层次分析法将个人判断进行量化处理,可以较好地减少主观性的影响。因此,有学者提出可以将两种方法结合使用,以更准确地评估复杂环境下的多因素影响,从而提高评估结果的科学性和可信度^[22]。

总之,明确职业健康风险评估模型中接触参数的赋值方法,是确保职业健康风险评估规范性的重要前提。鉴于职业接触存在个体差异和时间波动,为获取具有代表性的接触评估参数,研究者应重视 SEG 的划分,并制定合理的个体监测和定点监测采样策略。在健康风险评估中要关注多重化学物暴露带来的健康风险,基于性质相同或相似的化学物联合暴露的健康风险评估方法已相对成熟,我们需要研究不同性质危害因素的联合暴露对健康的影响,探究科学的解决方案。

参考文献

- [1] 徐秋凉,张美辨,许灵通,等."用人单位职业病危害综合风险评估方法"的完善和思考[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(6): 619-624.
XU Q L, ZHANG M B, XU L T, et al. Thoughts on improving comprehensive risk assessment method of occupational disease hazards of employers[J]. J Environ Occup Med, 2023, 40(6): 619-624.
- [2] 周莉芳,张美辨.职业健康风险评估方法学研究进展[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(2): 125-130.
ZHOU L F, ZHANG M B. Research progress on occupational health risk assessment methodology[J]. J Environ Occup Med, 2020, 37(2): 125-130.
- [3] Bullock W H, Ignacio J, Ignacio J S. A strategy for assessing and managing occupational exposures[M]. AIHA, 2006.
- [4] EPA (Environmental Protection Agency). Risk assessment guidance for Superfund—volume I: human health evaluation manual (part F, supplemental guidance for inhalation risk assessment)[J]. EPA 540-R-070-002, 2009.
- [5] COSHH Essentials. Easy steps to control health risks from chemicals[EB/OL]. [2024-10-01]. <https://www.hse.gov.uk/coshh/essentials/coshh-tool.htm>.
- [6] Ministry of Manpower Occupational Safety and Health Division. A semi-quantitative method to assess occupational exposure to harmful chemicals[R]. Singapore: Ministry of Manpower Occupational Safety and Health Division, 2005.
- [7] 冷朋波,边国林,王爱红,等.美国EPA吸入风险模型在木质家具制造企业职业健康风险评估中的应用[J]. 环境与职业医学, 2014, 31(11): 858-862.
LENG P B, BIAN G L, WANG A H, et al. Application of U. S. EPA inhalation risk model to occupational health risk assessment of wooden furniture manufacturing factories[J]. J Environ Occup Med, 2014, 31(11): 858-862.
- [8] 徐守香,王博深,韩磊,等.我国职业病危害作业分级和EPA吸入风险模型在接苯作业健康风险评估中的应用[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(4): 379-384.
XU S X, WANG B S, HAN L, et al. Application of China's occupational disease hazard classification and EPA inhalation risk model in health risk assessment of work exposed to benzene[J]. J Environ Occup Med, 2020, 37(4): 379-384.
- [9] International Council on Mining & Metals. Good practice guidance on occupational health risk assessment[EB/OL]. 2nd ed. [2024-07-01]. https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/health-and-safety/2016/guidance_health-risk-assessment-2016.pdf.
- [10] 林嗣豪,王治明,唐文娟,等.职业危害风险指数评估方法的初步研究[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2006, 24(12): 769-771.
LIN S H, WANG Z M, TANG W J, et al. A methodological study on occupational hazard risk index[J]. Chin J Ind Hyg Occup Dis, 2006, 24(12): 769-771.
- [11] 徐秋凉,张美辨,邹华,等.六种常用职业健康风险评估模型在小型印刷企业中的定量比较[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(2): 131-137.
XU Q L, ZHANG M B, ZOU H, et al. Quantitative comparison of six common occupational health risk assessment models for small printing companies[J]. J Environ Occup Med, 2020, 37(2): 131-137.
- [12] 叶飞,邢杨,刘冰冰,等.3种职业健康风险评估方法对比分析[J]. 职业与健康, 2018, 34(8): 1012-1016.
YE F, XING Y, LIU B B, et al. Comparative study on three kinds of occupational health risk assessment methods[J]. Occup Health, 2018, 34(8): 1012-1016.
- [13] 李飞,孔璐,王博深,等.基于四种风险评估模型的正己烷职业健康风险评估[J]. 环境与职业医学, 2024, 41(6): 655-660.
LI F, KONG L, WANG B S, et al. Occupational health risk assessment of n-hexane based on four risk assessment models[J]. J Environ Occup Med, 2024, 41(6): 655-660.
- [14] 张宏群,郭俊,冯宇梦.某体温计制造企业职业健康风险评估研究[J]. 职业与健康, 2023, 39(18): 2449-2455.
ZHANG H Q, GOU J, FENG Y M. Study on occupational health risk assessment of a thermometer manufacturer[J]. Occup Health, 2023, 39(18): 2449-2455.
- [15] 赵乾魁,孙原,刘武忠,等.由GBZ 2.1-2019发布带来的职业接触评估思考[J]. 职业卫生与应急救援, 2020, 38(5): 548-552.
ZHAO Q K, SUN Y, LIU W Z, et al. Thoughts on occupational exposure assessment after release of GBZ 2.1-2019[J]. Occup Health Emerg Rescue, 2020, 38(5): 548-552.
- [16] HOPF N B, ROUSSELLE C, PODDALGODA D, et al. A harmonized occupational biomonitoring approach[J]. Environ Int, 2024, 191: 108990.
- [17] 李刚,王忠旭,曹叔翹,等.职业暴露评估采样策略中的抽样及暴露测量问题探讨[J]. 中国卫生工程学, 2013, 12(2): 144-146,149.
LI G, WANG Z X, CAO S Q, et al. Discussion on subsampling methods and exposure measurement issues in sampling strategies for occupational exposure assessment[J]. Chin J Public Health Eng, 2013, 12(2): 144-146,149.
- [18] 李旭,车望军,邱泓,等.《工作场所空气中有害物质监测的采样规范》若干问题探讨[J]. 中国职业医学, 2012, 39(1): 60-61.
LI X, CHE W J, QIU H, et al. Discussion on some issues in Specification of Air Sampling for Hazardous Substances Monitoring in the Workplace[J]. Chin Occup Med, 2012, 39(1): 60-61.
- [19] PECE S, DASCALESU A. Risk assessment method for occupational accidents and diseases[EB/OL]. [2024-07-01]. http://www.protectiamuncii.ro/pdfs/risk_assessment_method.pdf.

(下转第 511 页)

- [68] YANG Z, MCLENDON C, HUTTER D, et al. Helicase-dependent isothermal amplification of DNA and RNA by using self-avoiding molecular recognition systems[J]. *ChemBioChem*, 2015, 16(9): 1365-1370.
- [69] XU D, MING X, GAN M, et al. Rapid detection of *Cronobacter* spp. in powdered infant formula by thermophilic helicase-dependent isothermal amplification combined with silica-coated magnetic particles separation[J]. *J Immunol Methods*, 2018, 462: 54-58.
- [70] DOSEEVA V, FORBES T, WOLFF J, et al. Multiplex isothermal helicase-dependent amplification assay for detection of *Chlamydia trachomatis* and *Neisseria gonorrhoeae*[J]. *Diagn Microbiol Infect Dis*, 2011, 71(4): 354-365.
- [71] KIM U, LEE S Y, OH S W. Thermophilic helicase-dependent amplification-based CRISPR/Cas12a system: detection of *stx2* in *Escherichia coli* O157: H7 by controlling primer dimers[J]. *Anal Chim Acta*, 2023, 1239: 340679.
- [72] LEE J E, KIM S A, PARK H J, et al. Colorimetric detection of norovirus by helicase-dependent amplification method based on specific primers integrated with HRPzyme[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2022, 414(23): 6723-6733.
- [73] MAHALANABIS M, DO J, ALMUAYAD H, et al. An integrated disposable device for DNA extraction and helicase dependent amplification[J]. *Biomed Microdevices*, 2010, 12(2): 353-359.
- [74] KOLM C, MARTZY R, FÜHRER M, et al. Detection of a microbial source tracking marker by isothermal helicase-dependent amplification and a nucleic acid lateral-flow strip test[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 393.
- [75] TANG R, YANG H, GONG Y, et al. A fully disposable and integrated paper-based device for nucleic acid extraction, amplification and detection[J]. *Lab Chip*, 2017, 17(7): 1270-1279.
- [76] ZULU N, IDRIS A O, ORIMOLADE B O, et al. Approaches for the detection of *Escherichia coli* in wastewater: a short review[J]. *ChemistrySelect*, 2023, 8(13): e202200598.
- [77] STRAKOVA N, KORENA K, GELBICOVA T, et al. A rapid culture method for the detection of *Campylobacter* from water environments[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(11): 6098.
- [78] NIE NIE A B, SIVALINGAM P, LAFFITE A, et al. Microbiological quality of water in a city with persistent and recurrent waterborne diseases under tropical sub-rural conditions: the case of Kikwit City, Democratic Republic of the Congo[J]. *Int J Hyg Environ Health*, 2017, 220(5): 820-828.
- [79] YADAV N, CHILLAR A K, RANA J S. Detection of pathogenic bacteria with special emphasis to biosensors integrated with AuNPs[J]. *Sens Int*, 2020, 1: 100028.
- [80] CAMPBELL V R, CARSON M S, LAO A, et al. Point-of-need diagnostics for foodborne pathogen screening[J]. *SLAS Technol*, 2021, 26(1): 55-79.
- [81] PANG B, ZHAO C, LI L, et al. Development of a low-cost paper-based ELISA method for rapid *Escherichia coli* O157: H7 detection[J]. *Anal Biochem*, 2018, 542: 58-62.
- [82] DESHMUKH R A, JOSHI K, BHAND S, et al. Recent developments in detection and enumeration of waterborne bacteria: a retrospective minireview[J]. *MicrobiologyOpen*, 2016, 5(6): 901-922.
- [83] NGUYEN P L, SUDHEESH P S, THOMAS A C, et al. Rapid detection and monitoring of *Flavobacterium psychrophilum* in water by using a hand-held, field-portable quantitative PCR system[J]. *J Aquat Anim Health*, 2018, 30(4): 302-311.
- [84] SALEEM F, SCHELLHORN H E, SIMHON A, et al. Same-day *Enterococcus* qPCR results of recreational water quality at two Toronto beaches provide added public health protection and reduced beach days lost[J]. *Can J Public Health*, 2023, 114(4): 676-687.
- [85] Patel C B, Shanker R, Gupta V K, et al. Q-PCR based culture-independent enumeration and detection of *Enterobacter*: an emerging environmental human pathogen in riverine systems and potable water[J]. *Front Microbiol*, 2016, 7: 172.
- [86] ZHANG Q, ISHII S. Improved simultaneous quantification of multiple waterborne pathogens and fecal indicator bacteria with the use of a sample process control[J]. *Water Res*, 2018, 137: 193-200.
- [87] MAUVISSEAU Q, DAVY-BOWKER J, BULLING M, et al. Combining ddPCR and environmental DNA to improve detection capabilities of a critically endangered freshwater invertebrate[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 14064.
- [88] FALZONE L, GATTUSO G, Lombardo C, et al. Droplet digital PCR for the detection and monitoring of *Legionella pneumophila*[J]. *Int J Mol Med*, 2020, 46(5): 1777-1782.
- [89] MARTZY R, KOLM C, BRUNNER K, et al. A loop-mediated isothermal amplification (LAMP) assay for the rapid detection of *Enterococcus* spp. in water[J]. *Water Res*, 2017, 122: 62-69.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 陈姣)

(上接第 502 页)

- [20] 李戡. 基于 Fuzzy 模型的职业病危害综合风险评估方法研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2013, 9(9): 90-95.
LI J. Study on assessment method of occupational hazard comprehensive risk based on fuzzy model[J]. *J Saf Sci Technol*, 2013, 9(9): 90-95.
- [21] 陈顺育, 郭进平, 王雪妮. 基于 AHP-风险矩阵法的矿山职业危害风险评估[J]. *金属矿山*, 2011, 40(9): 149-152.
CHEN S Y, GUO J P, WANG X N. Risk assessment of mine occupational haz-

ards based on AHP and risk matrix method[J]. *Met Mine*, 2011, 40(9): 149-152.

- [22] 郭金玉, 黄轶, 廖海江, 等. 多层次模糊综合评估汽车制造企业职业危害风险[J]. *中国安全生产科学技术*, 2011, 7(5): 81-85.
GUO J Y, HUANG Y, LIAO H J, et al. Comprehensive evaluation on the occupational hazard risk in automobile industry based on multi-stage fuzzy-AHP comprehensive assessment[J]. *J Saf Sci Technol*, 2011, 7(5): 81-85.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 赵芸稼)